

地质力学学报
Journal of Geomechanics
ISSN 1006-6616,CN 11-3672/P
中文核心期刊
中国科技核心期刊
CSCD 来源期刊（核心库）

《地质力学学报》预出版论文

论文题目：李四光科学思想与地热资源勘查开发：思想内核、历史实践与时代展望

作者：唐晓音，文冬光，胡圣标

DOI：10.12090/j.issn.1006-6616.2026078
投稿时间：2026-06-23
录用时间：2026-09-01
预出版时间：2026-11-18

《地质力学学报》预出版

预出版版权说明

预出版，是指在网络出版或纸质版印刷出版之前，文章的电子版本在网上提前公开，是正式出版的预备版本。预出版的文章是通过严格的“三审制”审查后，本刊确定录用的文章，其内容的著作权等受《著作权法》等法律法规保护。预出版的文章将在之后的印刷版上刊发，印刷版的文章可能与预出版的文章略有不同，预出版文章经录用后便以电子版本形式在网站发出，没有经过排版和编校，会存在部分文字及编排格式与正式出版有出入，但文章主体内容是完全一致的。

学者研究或引述预出版文章，应当以印刷纸质版内容为准；但如果牵涉首创权等时间问题，则应当以适当方式注明文章的预出版日期。

李四光科学思想与地热资源勘查开发：思想内核、勘查方法论与历史实践

唐晓音[1, 2, 3], 文冬光[1, 4], 胡圣标[5]

TANG Xiaoyin[1, 2, 3], WEN Dongguang[1, 4], HU Shengbiao[5]

1. 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081;

2. 自然资源部古地磁与古构造重建重点实验室, 北京 100081;

3. 中国地质调查局油气地质力学重点实验室, 北京 100081;

4. 中国地质调查局水文地质环境地质调查中心, 天津 300309;

5. 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029

1. *Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China;*

2. *Key Laboratory of Paleomagnetism and Tectonic Reconstruction, Ministry of Natural Resources, Beijing* 100081, *China*;

3. *Key Laboratory of Petroleum Geomechanics, China Geological Survey, Beijing* 100081, *China;*

4. *Center for Hydrogeology and Environmental Geology Survey, China Geological Survey, Tianjin* 300309, *China;*

5. *Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100029, *China;*

J.S. Lee's scientific thoughts and its role in geothermal resource exploration and development: Theoretical inheritance, methodology and practice

Abstract: [Objective] J.S. Lee's scientific thought, with geomechanics as its theoretical core and tectonic-system analysis as its methodological foundation, provides important theoretical underpinning for geothermal resource exploration and development. However, his pioneering work in the geothermal field remains insufficiently synthesized. **[Methods]** Drawing upon J.S. Lee's original works, chronicles, and historical archives, this study adopts an integrated approach of textual scholarship and theoretical interpretation. **[Results]** This paper distils Lee's original geothermal insights into a "tectonic-system-controlled geothermal theory," elucidates its theoretical connotations, and positions its methodological distinctiveness within the multi-scale spectrum of international geothermal research. **[Conclusions]** It constructs a methodological workflow from tectonic analysis to geothermal-field delineation, and reviews the historical trajectory from pilot validation to nationwide promotion, revealing how tectonic-system analysis has guided specific exploration deployments. **[Significance]** The tectonic-system-controlled geothermal theory demonstrates significant guiding value in regional geothermal distribution

基金项目：地球深部探测与矿产资源勘查国家科技重大专项（2024ZD1003602）；陕西省陆相页岩气成藏与开发重点实验室开放课题项目（YJSYZX25SKF0014）

This research was financially supported by the Deep Earth Probe and Mineral Resources Exploration - National Science and Technology Major Project (Grant No. 2024ZD1003602) and the Opening Foundation of Shaanxi Key Laboratory of Lacustrine Shale Gas Accumulation and Exploitation (Grant No. YJSYZX25SKF0014)

第一作者及通信作者：唐晓音（1987—），女，研究员，主要从事盆地热体制、构造-热演化研究。Email：xytang2019@126.com

《地质力学学报》预出版

prediction, precise geothermal-field targeting, and deep hot dry rock development, offering important methodological implications for national geothermal resource assessment, key technological breakthroughs, and deep thermal energy exploitation.

Keywords: J.S.Lee; geomechanics; tectonic system; geothermal resource; dual-carbon strategy

摘要： 李四光科学思想以地质力学理论为核心，以构造体系分析为方法论基础，为地热资源勘查开发提供了重要的理论支撑。然而，目前对其在地热领域的开创性工作缺乏系统梳理。文章基于李四光原著、年谱及历史档案，采用文献考证与理论阐释相结合的方法，将其在地热领域的原创性认识概括为“构造体系控热思想”，阐释其理论内涵，并在国际地热研究多尺度认识谱系中定位其方法论独特性；建构从构造解析到热田圈定的方法论流程；梳理从试点验证到全国推进的历史实践，揭示构造体系分析如何具体指导勘查部署。构造体系控热思想在区域地热分布预测、地热田精准定位及深部干热岩开发等方面具有较好的指导作用，对中国地热资源调查评价、关键技术攻坚及深部热能开发具有重要的方法论启示。

关键词:李四光;地质力学;构造体系; 热资源;双碳战略

中图分类号：P55；P314；N0　**文献标识码**：A　　**文章号**：

DOI：10. 12090 / j. issn. 1006-6616. 2026078

《地质力学学报》预出版

0 引言

地热资源具有储量丰富、清洁稳定、分布广泛等优势，是一种现实可行且具有竞争力的可再生能源，其开发利用在构建低碳能源结构、缓解全球气候变化等方面有重要实践价值（Huang，2012；庞忠和等，2014）。然而，其分布并非随机，而是严格受控于地壳构造格局与断裂系统，这一认知的理论源头可追溯至地质力学理论体系。

早在 20 世纪 50 年代初，地质部（现自然资源部）已开始热矿泉调查。1956 年，李四光在世界科协成立十周年纪念大会上，曾郑重指出，用不着想入非非就可以预料到，将来我们的子孙会责怪我们的科学家，为什么眼看着像煤这样贵重的物质被随便当作燃料烧掉而默不作声（李四光，1956）。1970 年，李四光在《天文、地质、古生物资料摘要（初稿）》中明确提出：地球是一个庞大的热库，有源源不断的热流……让这个随地可取的能量为人类的生活和生产服务（李四光，1972）。这一论断奠定了中国地热勘查开发的理论基石。同年，李四光赴天津考察地热利用，提出要在天津搞一次地热会战，把天津地热勘查开发作为一个试点和样板。1971 年，进一步前瞻性地提出“用干热”的设想，指出“目前用地下热水，我设想将来可以用干热，不一定用水”（汪民，2010），超越了当时水热型地热开发的局限。

李四光并未就地热学撰写独立专著，其地热认识散见于 20 世纪 20—70 年代的构造体系论述与晚年讲话中。核心逻辑在于构造体系不仅决定断裂的空间展布，更通过应力场控制断裂的力学性质，进而决定深部热能能否沿断裂向浅部传导。文章将这一原创性认识概括为“构造体系控热思想”，通过文献考证与理论阐释，明确其思想内核、勘查方法论及历史验证，以期为区域地热资源勘查提供可参照的理论框架与历史经验。

1 思想内核：构造体系控热思想的理论建构

以下对分散于李四光多篇原著（1926—1973年）中的地热相关论述进行系统归纳，属后验的理论重构而非历时性叙述。文中凡属延伸阐释与评述之处，均予以明确说明，以免与李四光原述相混淆。

1.1 构造体系：地热资源分布的理论基石

构造体系是地质力学的核心概念，被视为地壳运动的综合表现形式。李四光通过数十年的野外地质调查与理论研究逐步完善了这一框架。1926年在《地球表面形象变迁之主因》中提出大陆运动理论，为构造体系思想奠定雏形（李四光，1926）。1929年在《东亚一些典型构造型式及其对大陆运动问题的意义》中正式建立构造体系概念，明确其为许多不同形态、不同性质、不同等级和不同序次的构造形迹，在一定地质时期内，受同一地应力场作用而形成的有机组合（李四光，1929）。1962年在《地质力学概论》中系统划分了纬向构造体系、经向构造体系和扭动构造体系三大类型，为现代构造体系分类奠定了理论基础（李四光，1973）。

“构造体系的规律在国内、在世界范围内都是存在的，我们为什么不用这些规律?了解了构造体系，对我们认识热水的来源是很有好处的，因为较大量的地下水，是由深部来的，与构造有关”（李四光，1971a）。这一论断深刻揭示了构造体系分析是理解地热资源分布规律的根本方法。

1.2 构造体系与地热资源宏观分布

李四光原著系统阐述了构造体系理论，但未就其与地热资源宏观分布的对应关系展开专门论述，以下分析系文章依据其理论框架所作的延伸阐释。中国区域尺度上的纬向、经向与扭动三大构造体系共同构成了地热资源分布的宏观构造格架（图 1）。这些构造带的长期活动性决定了深大断裂的发育程度，进而控制了深部热能的传导路径。

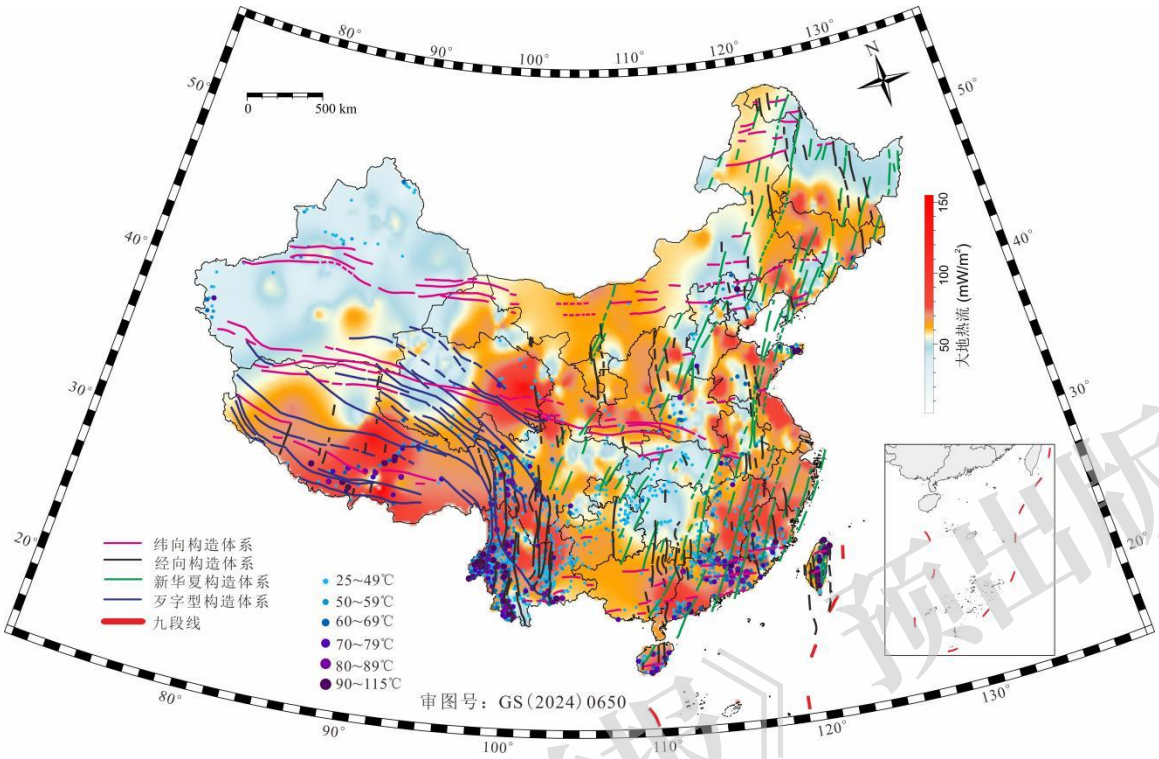
巨型纬向构造体系（近东西向）沿纬度方向展布，是地壳经向挤压作用的产物，其长期活动导致深大断裂发育（李四光，1973），为深部热能向上传导提供了重要通道。南岭构造带作为巨型纬向构造体系的重要组成部分，其东西向断裂与岩浆活动控制了华南地区中低温地热资源的形成与展布。

经向构造体系（近南北向）受地壳纬向挤压或拉伸作用形成，以川滇南北向构造带最为典型；该带地处青藏高原东缘，地壳活动性强、地应力集中，是中国西南地区高温地热资源的重要富集区，云南腾冲、四川康定等地热田即分布于该构造背景下的滇藏地热带（廖志杰和赵平，1999）。

扭动构造体系中，新华夏系（北北东向）是中国东部最重要的多字型构造体系，由一系列巨型隆起带与沉降带相间排列组成（李四光，1973）。新华夏系（中生代晚期—新生代）三大沉降带，第一沉降带（鄂霍次克海、日本海、黄海、东海、南海）、第二沉降带（松辽平原、华北平原、江汉平原、北部湾）、第三沉降带（呼伦贝尔–巴音和硕盆地、陕甘宁盆地、四川盆地；李四光，1973）。新华夏系三大沉降带具有长期活动性，带内沉积盆地发育，是沉积盆地型地热资源的主要分布区（张薇等，2019；陈墨香，1988）。此外，华夏系北东向断裂带及新华夏系北北东向断裂带亦控制了中国东南沿海地热资源的分布，广东丰顺、福建漳州等地热田即受莲花山断裂带、东南沿海断裂带等北东向构造控制（汪集旸等，1993）。

此外，不同构造体系的复合、交汇部位因应力叠加与断裂交织，往往形成深部热能上涌的优势通道。西藏羊八井地热田位于青藏滇缅印尼歹字型构造体系与东西向构造带的复合部位（康文华等，1985），其成功开发验证了复合构造区作为高温地热选区的科学依据。

《地质力学学报》预印版



大地热流值来自王一波等，2024；温泉数据来自王贵玲等，2017；主要构造体系简图据王治顺和李贵书，2002修改；底图据国家地理信息公共服务平台“天地图”行政区划可视化数据（https://cloudcenter.tianditu.gov.cn/administrativeDivision）

图 1 中国大陆地区大地热流等值线图、主要温泉分布与主要构造体系简图

Fig.1 Contour map of heat flow, distribution of major hot springs, and schematic diagram of major tectonic systems in mainland China

Heat flow data are sourced from Wang et al.2024, hot spring data from Wang et al. 2017, and the tectonic systems framework is modified after Wang and Li， 2002. The base map is based on the administrative division data from Tianditu, the National Catalogue Service For Geographic Information（https://cloudcenter.tianditu.gov.cn/administrativeDivision）

1.3 构造体系控热的力学机制

地热系统中深部热能向浅部的传导，在构造角度上主要依赖断裂网络作为优势通道，而断裂能否有效导通，取决于其力学性质。因此，断裂力学性质分析是构造体系控热思想的核心机制环节。地质力学理论基于莫尔–库仑破裂准则和应力分析，将断裂按力学性质分为张性、扭性和压性三类（李四光，1973），其力学原理与 Anderson（1951）的断裂力学理论相通。这一力学性质三分法虽属断裂力学的一般认识，但李四光的独特贡献在于将其与构造体系的空间展布相结合，指出同一构造体系内不同位置的断裂因局部应力状态差异而呈现不同力学性质。在此基础上，文章将三类力学性质与深部热能的传导效率相关联：张性断裂因岩体扩容形成优势导热通道，扭性断裂通过剪切破裂产生连通裂隙网络，而压性断裂因岩体压密起到阻水隔热作

《地质力学学报》预出版

用，从而可在区域尺度上预测导热通道的优势分布。需要说明的是，这一“力学性质-控热功能”的对应阐释系文章面向地热问题的延伸，而非李四光原述。构造体系正是通过控制断裂系统的发育格局与力学性质，决定了深部热源与浅部热储之间的能量传导效率。

1.4 构造体系控热思想的方法论定位

当前国际地热研究在构造维度上已形成多尺度、多学科交织的认识谱系。在全球尺度，板块构造理论解释地热资源的大地构造分带性（Moeck，2014）；在盆地尺度，沉积盆地热演化分析揭示中低温地热系统的成因（Procesi et al.，2019）；在热源端，岩浆-火山系统与地幔柱理论解释高温热异常的起源（Morgan，1971）；在局部尺度，断裂力学与构造地质学分析识别热量传导的通道（Faulds et al.，2010）。这些认识分别对应不同尺度与不同科学问题，但彼此之间存在一个区域尺度的方法论断层：如何将区域构造格局与热田分布建立系统联系？

需要说明的是，以下对“构造体系控热思想”方法论独特性的定位，系文章对于国际地热研究谱系后所作的评述性概括，并非李四光本人的自我定位。根据研究总结，该思想的独特性正在于提供了这一桥梁，其方法论贡献体现为 3 个层面。其一，确立“构造体系”作为区域地热预测的基本单元。不是孤立地研究单条断裂，而是将断裂纳入构造体系这一整体框架，强调同一应力场下不同序次、不同力学性质断裂的有机组合对地热系统的整体控制。这实现了从“单点断裂分析”到“区域格局预测”的方法论提升。其二，建立“力学性质”分类控热的判别标准。不仅关注断裂是否存在，更关注断裂的力学性质（张性、扭性、压性），并据此判断其导热或隔热功能，实现了从“断裂有无”到“断裂优劣”的认识深化。其三，引入“古今应力场”动态继承的评估机制。强调构造体系的形成与演化过程，通过判断现今应力场与古应力场的继承关系，评估断裂的现今导热能力，将静态的构造解析拓展为动态的热场预测。这 3 个层面共同构成了“构造体系–应力场–断裂力学性质–导热通道–热田分布”的区域勘查方法论链条，在全球尺度与田区尺度之间建立了区域尺度的构造控热分析框架，对板块内部地热资源勘查具有独特的方法论价值。

2 勘查方法论：从构造解析到热田圈定的系统化流程

文章依据地质力学构造解析方法，将构造体系控热思想落实为勘查部署。先总体阐述方法论框架，再按勘查工作顺序，分述区域识别（构造体系分析与热带圈定）和精细勘查（热储验证与热田定位）2 个阶段的具体步骤。需说明的是，李四光生前未及将构造解析整理为面向地热勘查的系统化流程，文中流程系文章依据其地质力学方法论思想、结合历史勘查实践所作的建构与归纳。

2.1 方法论框架：构造反推与热场预测

《地质力学学报》预出版

地质力学的关键方法论，在于建立由构造现象追溯地壳运动原因的逻辑链，即“由形迹反推运动、由现今反演历史”的构造解析思维（李四光，1973）。将这一思维用于地热成因机制解析，可展开为前后衔接的 4 个步骤：① 识别构造形迹，判别控热断裂的力学性质（张性、扭性、压性）；② 归并构造体系，将断裂纳入所属构造体系，确定区域构造格架与热田的构造归属；③ 分析应力场，判断古应力场与现今应力场的方向、体制及继承关系；④ 推断地壳运动，据此反演深部热能沿断裂向浅部传导的路径，预测现今热状态。其中，第① ②步由局部形迹上升到区域格局，回答“热在哪里可能出现”；第③ ④步由构造历史推进到现今热场，回答“热是否仍能到达浅部”。4 个步骤前后衔接，构成由构造形迹到现今热场的认识主线。

然而，断裂力学性质是断裂形成期或某一活动期应力状态的记录（李四光，1973），且同一断裂面可因多期活动而改变性质，并不等同于断裂的现今状态。断裂能否构成有效导热通道，直接取决于断裂带现今的开启程度、连通性、胶结充填状况及现代应力场下的断面受力状态（Zoback，2007；汪集旸等，1993）。只有当断裂持续活动、古今应力场保持继承时，形成期的力学性质才可用于推断现今导热能力（邓起东，2002）；否则由构造形迹推断现今热场的第③④步即失去依据。

构造活动是否具有继承性，决定了构造体系控热思想的适用边界：构造带自新生代（66 Ma 以来）持续活动者，古、今应力场多具继承性，断裂力学性质可作为判别现今导热能力的依据；构造带形成较早而中、新生代未明显活化者，古、今应力场可能已解耦，则须引入现代地球物理与地球化学证据作为补充约束。继承性判别目前尚无统一的量化阈值，实际工作中多采用多证据组合与半定量参数相结合的方式（邓起东，2002）。在多证据定性判别层面，可认定为“具有继承性”的典型证据包括：①断裂存在第四纪晚期以来的活动证据，如断错地貌、河流阶地或洪积扇变形，且断错地层年代学（^{14}C、光释光等）限定最新活动年龄在晚更新世—全新世范围内；②沿断裂带存在现代微震活动（台网定位的线性微震条带），或 GPS、InSAR 揭示的现今形变与应变积累信号（杨晓平等，2005；Heidbach et al.，2025）；③断裂带上温泉、土壤气（CO_2、He、Rn）释放等现代热流体活动持续。上述 3 类证据中至少有 2 类同时出现、且分别来自不同观测手段时，可判定构造活动具有继承性。在半定量参数约束层面，还可参考以下判据：①由现今地应力测量或震源机制解反演的最大主压应力方向与区域古构造应力场方向的偏差，一般小于 30° 可视为方向一致（许忠淮和戈澍谟，1984；Heidbach et al.，2025）；②断裂第四纪晚期平均滑动速率达 0.01～0.1 mm/a 量级，即具备可测的现今活动性（Styron and Pagani，2020）。就中国主要构造带而言，青藏高原东缘、华北平原等构造活动持续地区，现今应力场与古应力场具有继承性，断裂力学性质分析可为地热成因机制提供有效约束（徐纪人和赵志新，2006）；华南内陆某些加里东期断裂带等构造活动已趋稳定地区，古应力场与现今热场的对应关系则需审慎评估（李三忠等，2016）。后者断裂虽保留古构造形迹，渗透性却可能因矿化充填或应力封闭而显著降低，不再构成有效的导热通道，须结合实测地温梯度、热液矿物 U-Pb 或 ESR 年代学及 He 同位素示踪等流体地球化学手段，综合判断其现今导热能力。总之，上述判别表明，构造体系的现今状态始终是历史演化的结果，断裂导热能力须在其演化过程中判定。这正是地质力学动态演化思维在地热勘查中的体现。

随着现代测量技术的发展，构造解析方法正从定性描述向定量—半定量分析转变。GPS、InSAR、地应力测量等技术的进步，使地应力场的定量化研究成为可能。在地热勘查中，这意味着应力场分析与现今热状态推断不再仅依赖野外露头的构造形迹观察，而可通过地应力实测数据判定断裂的现今力学状态（正断层应力体制下，垂向主应力大于最大水平主应力，最大水平主应力大于最小水平主应力，有利于垂向导热），为地热井钻探靶区优选、干热岩储层改造方向设计提供定量约束（Zoback，2007）。

上述 4 个步骤落实到勘查部署，形成“先找热带、再找热田”2 个阶段流程：第① ②步主要落实于区域识别阶段，据以圈定热带；第③ ④步主要落实于精细勘查阶段，据以在热储验

证中定位热田。前者解决勘查选区，后者解决靶区定位。2 个阶段系工作部署的划分，4 个步骤的认识逻辑贯穿全过程，二者并非简单的一一对应。

2.2 区域识别：构造体系分析与热带圈定

区域识别是勘查部署的 2 个阶段流程中首要环节，对应方法论框架提及的 4 个步骤中的前 2 个步骤（识别构造形迹、归并构造体系）。其逻辑前提是构造体系决定地热资源的宏观分布格局，勘查须自区域构造格局入手，而非孤立寻找局部热异常。

区域识别包括 3 个递进层次。第一层次为构造体系归并：通过区域地质填图与遥感解译，识别研究区所属的构造体系类型（纬向、经向或扭动体系），判断其活动性与深大断裂发育程度，初步圈定地热资源的有利区带。第二层次为断裂活性评价：基于 1.3 节所述的断裂力学性质分类（张性、扭性、压性），重点识别控热断裂的力学属性，据此判断深部热能向上传导的可能性。第三层次为物探验证：运用重力、磁法、地震等手段查明区域构造格架，识别隐伏断裂与基底隆起，圈定热异常区的空间范围。

1970 年，李四光在听取北京水文地质一大队汇报后进一步指出：目前，就是找热异常区的所在，然后看地温梯度的变化（李四光，1970a）。这一指示将区域识别的目标具体化：识别热异常区（热带），获取地温梯度变化信息，为后续热田定位奠定基础。

2.3 精细勘查：热储验证与热田定位

在区域识别圈定热带之后，勘查工作转入精细勘查阶段。其核心任务是在热带内部通过系统勘查，验证热储条件、获取温度数据，即热储验证；最终圈定具体热田的范围与边界，即热田定位。这一阶段的逻辑是：从“知道哪里有热”推进到“知道热在哪里”。

精细勘查遵循渐进逻辑。第一步为浅钻验证：在热带内选择构造有利部位实施浅层钻探，获取地温梯度、岩性、含水层等基础数据，验证热异常的存在与成因。第二步为深钻评价：在浅钻验证成功的基础上，部署深部钻探揭露热储层，测定热储温度、厚度、渗透率等关键参数，评价开发潜力。第三步为热田圈定：综合钻探、物探与地质资料，预测热田范围、圈定热田边界，编制地热田分布图，为开发方案设计提供依据。

从区域识别到精细勘查的衔接，体现了地质力学系统论而非要素论的科学思维。地质力学理论强调从整体、系统的角度分析构造问题，将地壳视为一个有机整体，研究不同构造形迹之间的内在联系与相互作用。上述两阶段流程正是这一系统论思维在勘查实践中的具体体现，可有效克服地热勘查中重局部、轻整体的倾向。

3 历史实践：构造控热的勘查验证

3.1 试点验证：天津与北京的中低温地热开发

1970 年 10 月，李四光赴天津考察地热利用。他参观了红旗鸭场的养鸭车间和温室大棚后指出，天津利用中低温地热从事温室种植、家禽养殖、居民洗浴和冬季供暖，是一件前无古人的事业，具有开辟道路的意义。李四光明确提出，要在天津搞一次地热会战，把天津地热勘查开发作为一个试点和样板。在其倡导下，天津于当年 12 月成立地热会战指挥部，相继开展了重力勘测、地温测量、钻井勘探、开发利用试验等工作。其中，重力勘测旨在查明区域构造格架，验证新华夏系断裂控热预测；地温测量旨在圈定构造体系预测的热异常区。天津地热会战

《地质力学学报》预出版

取得了丰硕成果：在天津市区及近郊范围内，发现了王兰庄和万家码头 2 个地热异常区（天津地温泉志编委会，2018），为后续多个地热田的勘查奠定了基础。

相较于天津的系统会战，北京的地热勘查规模较小。基于北京城区地处新华夏系第二沉降带北部、受新华夏系北北东向断裂控制的构造认识，推测北京城区作为华北坳陷的一部分，深层可能赋存热水。1971 年在原先没有地热显示的北京城区先后于氧气厂、天坛公园、北京火车站等地钻成了千米左右深的热水井，这些井位均部署于新华夏系北北东向断裂构造有利部位，出水温度 39～52 ℃，单井昼夜出水量约 1000 km^3（刘树芳和郑克棪，1995）。这些井的成功钻探，验证了新华夏系断裂对华北北部地热资源的控制作用，为北京城区地热资源的开发奠定了基础。

3.2 全国推进：多区域地热勘查与利用

李四光（1971b）指出：“我这样说，并不是说发电不重要，发电也是重要的。但从我们的实际情况出发，中低温则是大量的，特别是重点在工农业的广泛利用，这就很有意义了。”这一认识为优先开发中低温地热资源、逐步积累经验并向高温地热拓展提供了理论依据。

在构造体系控热思想的指导下，加之天津地热会战的示范效应，20 世纪 70 年代中国掀起了第一次地热开发热潮。全国范围内先后有 20 多个省、市、自治区开展了地热勘查和综合利用等项工作，并取得显著成绩，利用形式涵盖温室种植、水产养殖、洗浴医疗及地热发电等多个领域（中共党史人物研究会，2000）。

广东丰顺邓屋地热田处于北东向莲花山断裂与北西向汾水断裂交织的断裂体系内，深切而活动的断裂为深部热流体上涌与热量交换提供了通道（张金川等，2026）。1970 年 12 月，该热田建成中国第一座地热试验电站，标志着中国地热发电的起步（中共党史人物研究会，2000）。同期投入运行的还有江西宜春温汤、河北怀来后郝窑、湖南宁乡灰汤、辽宁盖县（今盖州市）熊岳、山东招远、广西象州等中低温地热试验电站（苏正等，2014）。这批早期热田的选址均处于区域断裂发育、热显示集中的部位，从构造控热的角度看，正体现了构造体系控热思想对地热勘查部署的指导意义。

在积累中低温经验的基础上，高温地热勘查取得突破。1973~1976 年，中国科学院青藏高原综合科学考察队对西藏高原地热活动进行了系统考察，随后地质力学研究所等单位深入开展了羊八井热田的地热地质研究（汪集旸，1989；佟伟等，1981）。羊八井地热田地处青藏滇缅印尼歹字型构造体系头部与近东西向构造带的复合部位，受念青唐古拉山南缘断裂与羊八井—当雄断裂控制（康文华等，1985；多吉，2003）。构造体系复合部位应力叠加、断裂交织，形成深部热能上涌的优势通道（康文华等，1985；廖志杰和赵平，1999）。1975 年发现高温地热资源，1977 年 10 月 1 日，羊八井地热电站 1000 kW 试验机组发电成功，成为中国第一个高温地热电站（佟伟等，1981；廖志杰和赵平，1999），标志着中国地热开发由中低温利用向高温发电的跨越。羊八井的成功，是构造体系控热思想在复杂构造区指导高温地热勘查的典范。

上述典型地热田的发现过程都遵循了“先构造分析→再物探验证→后钻探” 的流程：天津地热会战以新华夏系第二沉降带的构造定位为前提，先行部署重力勘测与地温测量查明区域构造格架、圈定热异常区，再实施钻探验证；北京城区地热勘查依据新华夏系北北东向断裂控热的构造分析部署井位，钻探揭露了千米左右深的热水储层；羊八井热田则经青藏高原综合科学考察识别出歹字型构造体系头部与近东西向构造带的复合部位，继以物探圈定热储，最终经钻探证实高温资源。这一流程与前文“先找热带、再找热田”的两阶段方法论一脉相承，是构造体系控热思想具体指导勘查部署的实证。

《地质力学学报》录用稿

3.3 前瞻预判：从地下热水到干热岩的远见

1971 年 2 月 20 日，李四光会见了天津地热指挥部负责人。他指出：地球是一个很大的热库，现在我们还在门外，向深处去能量是很大很大的。利用大门里的热，我想随着我国工农业建设的发展，我们是一定能做到的（李四光，1971b）。目前用地下热水，我设想将来可以用干热，不一定用水。因为高温向低温流，就可以引出来用，没水、没气、热就看不见，但很现实，是客观存在的，就像地应力是客观存在的一样。我想将来是可以发现这种方法。打开热库大门，不只是为我国开辟新路，对世界也是开新路，从而对人类做出较大的贡献（李四光，1970b）。

这一论述提出了向深部热能拓展的战略方向。其中“高温向低温流”的表述，体现了对热传导基本原理（傅里叶定律）的直觉认识；“用干热，不一定用水”的设想，则超越了当时水热型地热开发的局限，具有前瞻意义。需要指出的是，该设想所指的“干热”与当代干热岩（Hot Dry Rock，HDR）或增强型地热系统（EGS）在技术内涵上存在差异。前者是原则层面的前瞻性判断（基于热传导基本原理推知深部取热的可能性），后者是工程层面的系统实现（依托人工压裂、井间连通等具体技术路径）。但二者在“向深部岩体取热”这一战略方向上高度一致。

1971 年 4 月 29 日，李四光动脉瘤突然破裂，经抢救无效逝世。逝世后在其遗物中发现一张纸条，上面写着：“在我们这样一个伟大的社会主义国家里，我们中国人民有志气、有力量克服一切科学技术上的困难，去打开这个无比庞大的热库，让它为人民所利用。如果我们不这样做，而还是走资本主义陈腐的老路，把地球交给我们珍贵的遗产——煤炭之类内容极其丰富的财富，不管青红皂白一概当作燃料烧掉，不到一千年，我们的后代，对我们这种愚蠢和无所作为的行径，是不会宽恕的。”这张纸条现存于李四光纪念馆，是研究李四光地热思想的重要史料。

半个世纪后，“用干热”设想开始在中国落地实施。“十三五”期间，在全国干热岩资源调查评价基础上，陆续开展了山东利津、青海共和、东北长白山、东南沿海、江苏苏北、山西大同等典型地区的干热岩勘查工作，实施干热岩钻探 10 余处，取得了多项突破（文冬光等，2023）。

共和盆地位于青藏滇缅印尼歹字型构造体系与纬向构造带复合部位，构造体系分析不仅指导了钻探靶区优选，更为储层压裂设计提供了地应力场方向约束。2017 年，青海省共和盆地恰卜恰镇 GR1 井在 3705 m 深度首次探得 236 ℃的优质干热岩体（张森琦等，2018），实现干热岩勘查重大突破。在储层建造过程中，系统的地应力测量和微地震监测表明，压裂形成的缝网优势方向与基于构造体系理论推断的现今地应力场方向一致，证实了构造体系分析方法对储层改造设计的指导价值。2021 年实施井间循环连通并成功实现了国内首例干热岩试验性发电并网，初步建立了中国首个干热岩地质调查、资源评价、物探、钻探、压裂、监测、发电等勘查开发全流程技术体系（Zhang et al.， 2022）。此外，山西大同（位于新华夏系断裂带与纬向构造带复合部位）、河北马头营（位于新华夏系第二沉降带）、江苏兴化（位于新华夏系第三沉降带东缘）等多地也相继开展不同地质背景条件下的试验性发电探索。这些选址均考虑了区域构造体系类型对干热岩资源潜力的控制作用。这一系列成就的取得，正是对“打开地下热库大门”战略设想的回应，也是构造体系控热思想从战略指导走向技术落地的生动例证。

4 结束语

构造体系控热思想是中国地热科学的重要理论源头之一。文章将其在地热领域的原创性认识概括为“构造体系控热思想”，阐释了这一思想的科学内涵，明确了其在国际地热研究多尺度认识谱系中的方法论定位。历史实践表明，从 1954 年热矿泉调查，到 1970 年天津地热会战，再到 1971 年前瞻性地提出“用干热”设想，该思想以系统论、动态演化和战略前瞻思维，为中国地热事业奠定了理论与方法基础。在双碳战略背景下，这一思想对深部地热勘查、干热岩储层改造和增强型地热系统选区仍具有理论指导和方法论参考价值。

致谢

感谢李四光纪念馆提供的历史文献支持。

作者贡献声明：唐晓音负责论文写作、图件绘制和文章修改；文冬光负责论文构思和内容校对；胡圣标负责基础资料提供、内容与图件审核。所有作者均阅读并同意稿件的提交和发表。

Author Contributions: Tang Xiaoyin conceived the manuscript writing, figure preparation, and manuscript revision; Wen Dongguang was responsible for study conception and content proofreading; Hu Shengbiao provided the basic data and reviewed the content and figures. All authors have read and approved the submission and publication of the manuscript.

利益冲突声明：本文所有作者声明本研究无任何利益冲突。

Conflict of Interests : All authors declare no conflict of interests.

References

ANDERSON E M, 1951. The dynamics of faulting and dike formation with application to Britain[M]. 2nd ed. Edinburgh: Oliver and Boyd.

CHEN M X, 1988. Geothermics of North China[M]. Beijing: Science Press. (in Chinese)

DUO J, 2003. Basic characteristics of the Yangbajing geothermal field: A typical high-temperature geothermal system[J]. Engineering Science, 5(1): 42-47. (in Chinese with English abstract)

DENG Q D. 2022. Advances and overview on researches of active tectonics in China[J]. Geological review, 48(2): 168-177. (in Chinese with English abstract)

FAULDS J E, COOLBAUGH M F, BENOIT D, et al., 2010. Structural controls of geothermal systems in the northern Great Basin[C]//Proceedings of the World Geothermal Congress. Bali, Indonesia.

HEIDBACH O, RAJABI M, DI GIACOMO D, et al., 2025. World Stress Map Database Release 2025[R]. GFZ Data Services. https://doi.org/10.5880/WSM.2025.001

HUANG S P, 2012. Geothermal energy in China[J]. Nature Climate Change, 2(8): 557-560.

KANG W H, LI D L, BAI J Q, 1985. Geothermal geology of the Yangbajing Geothermal field in Tibet[J]. Bulletin of the Institute of Geomechanics CAGS, (6): 17-79. (in Chinese with English abstract)

《地质力学学报》预出版

LEE J S, 1929. Some typical structural patterns in East Asia and their significance to the problem of continental movement[M]//LEE J S. Collected scientific works of J. S. Lee(in 2021), Vol. 9, collection of speeches. Beijing: Geological Publishing House: 243-297. (in Chinese)

LEE J S, 1956. Speech at the 10th Anniversary Meeting of the World Federation of Scientific Workers[N]. People's Daily, 04-05(3). (in Chinese)

LEE J S, 1970a. Talk on Beijing geothermal work reported by Hydrological Brigade No. 1 (Mar. 1970)[M]//LEE J S. Collected scientific works of J. S. Lee(in 2021), Vol. 9, collection of speeches. Beijing: Geological Publishing House: 54. (in Chinese)

LEE J S, 1970b. Discussion with representatives of geological colleges on establishing geostress specialty (Nov. 6, 1970)[M]//LEE J S. Collected scientific works of J. S. Lee(in 2021), Vol. 9, collection of speeches. Beijing: Geological Publishing House: 146. (in Chinese)

LEE J S, 1971a. Talk on geothermal water exploration work in Houhaoyao (Mar. 12, 1971)[M]//LEE J S. Collected scientific works of J. S. Lee(in 2021), Vol. 9, collection of speeches. Beijing: Geological Publishing House: 69-71. (in Chinese)

LEE J S, 1971b. Talk with comrades of Tianjin Geothermal Command Headquarters (Feb. 20, 1971)[M]// LEE J S. Collected scientific works of J. S. Lee(in 2021), Vol. 9, collection of speeches. Beijing: Geological Publishing House: 68. (in Chinese)

LEE J S, 1972. A Summary of Astronomical, Geological and Paleontological Data (Preliminary Draft) [M]. Beijing: Science Press. (in Chinese)

LEE J S, 1973. Introduction to geomechanics[M]//LEE J S. Collected scientific works of J. S. Lee(in 2021), Vol. 2, geomechanics (II). Beijing: Geological Publishing House: 44-45. (in Chinese)

LEE J S. The Main Cause of Changes in Earth's Surface Features[C]//Geological Society of China. Proceedings of the 4th Annual Meeting of the Geological Society of China, 1926.

LIAO Z J, ZHAO P, 1999. Yunnan-Tibet Geothermal Belt: Geothermal Resources and Typical Geothermal Systems[M]. Beijing: Science Press. (in Chinese)

LI S Z, LI X Y, ZHAO S J, et al., 2016. Global Early Paleozoic orogens (Ⅲ): Intracontinental orogen in South China[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 46(4): 1005-1025. (in Chinese with English abstract)

MOECK I S, 2014. Catalog of geothermal play types based on geologic controls[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 37: 867-882.

MORGAN W J, 1971. Convection plumes in the lower mantle[J]. Nature, 230(5288): 42-43.

PANG Z H, HUANG S P, HU S B, et al., 2014. Geothermal studies in China: Progress and prospects 1995-2014[J]. Chinese Journal of Geology (Scientia Geologica Sinica), 49(3): 719-727. (in Chinese with English abstract)

《地质力学学报》预出版

PROCESI M, CIOTOLI G, MAZZINI A, et al., 2019. Sediment-hosted geothermal systems: Review and first global mapping[J]. Earth-Science Reviews, 192: 529-544.

Research Society for Biographical Figures of the CPC History. Biographies of historical figures of the Communist Party of China: Vol. 67[M]. Beijing: Central Party Literature Press, 2000: 76-78. (in Chinese)

SU Z, WANG X X, HU J, WU N Y, 2014. The site selection for enhanced geothermal system in China[J]. Progress in Geophysics, 29(1): 386-391. (in Chinese with English abstract)

STYRON R H, PAGANI M. The GEM Global Active Faults Database (GAF-DB v1.0)[J]. Earthquake Spectra, 2020, 36(1_suppl): 160-180.

TONG W, ZHANG M T, ZHANG Z F, et al., 1981. Geothermal Heat in Xizang[M]. Beijing: Science Press. (in Chinese)

Tianjin Geothermal (HotSprings) Journal Editorial Committee. 2018. Tianjin Geothermal (HotSprings) Journal[M]. Tianjin: Tianjin Science and Technology Press. (inChinese)

WANG G L, ZHANG W, LIANG J Y, et al., 2017. Evaluation of geothermal resources potential in China[J]. Acta Geoscientica Sinica, 38(4): 449-459. (in Chinese with English abstract)

WANG J Y, 1989. Geothermal studies in China—promoted by professor Li Siguang (J. S. LEE) [J]. Quaternary Sciences, 9(3): 279-285. (in Chinese with English abstract)

WANG J Y, XIONG L P, PANG Z H, 1993. Medium-to-low temperature convective geothermal systems[M]. Beijing: Science Press. (in Chinese)

WANG Z S, LI G S, 2002.. Major structural systems in China[C]//MA L F, QIAO X F, MIN L R, et al (eds.). Geological Atlas of China. Beijing: Geological Publishing House: 45-48. (in Chinese).

WANG Y B, LIU S W, CHEN C Q, et al., 2024. Compilation of terrestrial heat flow data in continental China (5th edition). Chinese Journal of Geophysics (in Chinese), 67(11): 4233-4265. (in Chinese with English abstract)

WANG M, 2010. Geothermal energy in China: achievements and prospects[M]. Beijing: Geological Publishing House. (in Chinese)

WEN D G, ZHANG E Y, WANG G L, et al., 2023. Progress and prospect of hot dry rock exploration and development[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 50(4): 1-13. (in Chinese with English abstract)

XU Z H, GE S M, 1984. Stress field in the Fuyun, Xinjiang earthquake fracture zone determined by fitting fault slip vector data[J]. Acta Seismologica Sinica,, 6(4): 395-404. (in Chinese with English abstract)

XU J R, ZHAO Z X, 2006. Regional characteristics of the lithospheric stress field and tectonic motions in China and its adjacent areas[J]. Geology in China, 33(4): 782-792. (in Chinese with English abstract)

《地质力学学报》预出版

YANG X P, DENG Q D, FENG X J, 2005. The Tieluzi Fault interior eastern-Qinling Mountains—an active strike-slip fault[J]. Earthquake Research in China, 21(2): 172-183. (in Chinese with English abstract)

ZHANG E Y, WEN D G, WANG G L, et al., 2022. The first power generation test of hot dry rock resources exploration and production demonstration project in the Gonghe Basin, Qinghai Province, China[J]. China Geology, 5(3): 372-382.

ZHANG S Q, YAN W D, LI D P, et al., 2018. Characteristics of geothermal geology of the Qiabuqia HDR in Gonghe Basin, Qinghai Province[J]. Geology in China, 45(6): 1087-1102. (in Chinese with English abstract)

ZHANG W, WANG G L, LIU F, et al., 2019. Characteristics of geothermal resources in sedimentary basins[J]. Geology in China, 46(2): 255-268. (in Chinese with English abstract)

ZHANG J C, LIN T Y, SUN Y H, et al, 2026. Formation model of Fengshun hydrothermal geothermal system in Cathaysian orogenic system[J]. Petroleum Exploration and Development, 53(4): 1007-1019. (in Chinese with English abstract)

ZOBACK M D, 2007. Reservoir geomechanics[M]. Cambridge: Cambridge University Press.

附中文参考文献

陈墨香, 1988. 华北地热[M]. 北京: 科学出版社.

多吉, 2003. 典型高温地热系统—羊八井热田基本特征[J]. 中国工程科学, 5(1): 42-47.

邓起东, 2002. 中国活动构造研究的进展与展望[J]. 地质论评, 48(2): 168-177.

康文华, 李德禄, 白嘉启, 1985. 西藏羊八井热田地热地质[J]. 中国地质科学院地质力学研究所所刊, (6): 17-79.

李四光, 1926. 地球表面形象变迁之主因[C]// 中国地质学会. 中国地质学会第四次年会报告.

李四光, 1929. 东亚一些典型构造型式及其对大陆运动问题的意义[M]//李四光.李四光科学论著集(2021 年): 第一卷: 地质力学(一). 北京: 地质出版社: 243-297.

李四光, 1956. 在世界科协成立十周年纪念大会上的发言[N]. 人民日报, 04-05(3).

李四光, 1970a. 听取水文一大队汇报北京地热工作情况时的谈话(1970.3)[M]//李四光科学论著集(2021 年): 第九卷: 讲话辑丛. 北京: 地质出版社: 54.

李四光, 1970b. 与地质院校代表座谈建立地应力专业问题(1970.11.6)[M]//李四光科学论著集(2021 年): 第九卷: 讲话辑丛. 北京: 地质出版社: 146.

李四光, 1971a. 关于后郝窑地热水勘探工作的谈话(1971.3.12)[M]//李四光科学论著集(2021 年): 第九卷: 讲话辑丛. 北京: 地质出版社: 69-71.

李四光, 1971b. 会见天津市地热指挥部同志时的谈话(1971.2.20)[M]//李四光科学论著集(2021 年): 第九卷: 讲话辑丛. 北京: 地质出版社: 68.

《地质力学学报》预出版

李四光, 1972. 天文·地质·古生物资料摘要(初稿)[M]. 北京: 科学出版社.

李四光, 1973. 地质力学概论[M]//李四光. 李四光科学论著集(2021 年): 第二卷: 地质力学(二). 北京: 科学出版社: 44-45.

李三忠, 李玺瑶, 赵淑娟, 等, 2016. 全球早古生代造山带(Ⅲ): 华南陆内造山[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 46(4): 1005-1025.

廖志杰, 赵平, 1999. 滇藏地热带:地热资源和典型地热系统[M]. 北京: 科学出版社.

刘树芳, 郑克棪, 1995. 试论城市地热工作的特点——以北京地热资源开发为例[J].北京地质, (3): 17-21.

庞忠和, 黄少鹏, 胡圣标, 等, 2014. 中国地热研究的进展与展望(1995—2014)[J]. 地质科学, 49(3): 719-727.

佟伟, 章铭陶, 张知非, 等, 1981. 西藏地热[M]. 北京: 科学出版社.

天津地热温泉志编委会, 2018.天津地热(温泉)志[M].天津: 科学技术出版社.

汪集旸, 1989. 李四光教授倡导的中国地热研究[J]. 第四纪研究, 9(3): 279-285.

汪集旸, 熊亮萍, 庞忠和, 1993. 中低温对流型地热系统[M]. 北京: 科学出版社.

汪民，2010. 中国地热能：成就与展望[M]. 北京：地质出版社.

王治顺, 李贵书, 2002. 中国主要构造体系图[C]//马丽芳, 乔秀夫, 闪隆瑞, 等. 中国地质图集. 北京: 地质出版社: 45-48.

王一波,刘绍文,陈超强,等, 2024.中国陆域大地热流数据汇编(第五版)[J].地球物理学报, 67(11): 4233-4265.

王贵玲, 张薇, 梁继运, 等, 2017. 中国地热资源潜力评价[J]. 地球学报, 38(4): 449-459.

文冬光, 张二勇, 王贵玲, 等, 2023. 干热岩勘查开发进展及展望[J]. 水文地质工程地质, 50(4): 1-13.

许忠淮, 戈澍谟, 1984. 用滑动方向拟合法反演富蕴地震断裂带应力场[J]. 地震学报, 6(4): 395-404.

徐纪人, 赵志新, 2006. 中国岩石圈应力场与构造运动区域特征[J]. 中国地质, 33(4): 782-792.

杨晓平, 邓起东, 冯希杰, 2005. 东秦岭内部铁炉子断裂带的最新走滑活动[J]. 中国地震, 21(2): 172-183.

中共党史人物研究会. 中共党史人物传：第 67 卷[M]. 北京：中央文献出版社，2000：76-78.

张森琦, 严维德, 黎敦朋, 等, 2018. 青海省共和县恰卜恰干热岩体地热地质特征[J]. 中国地质, 45(6): 1087-1102.

张薇, 王贵玲, 刘峰, 等, 2019. 中国沉积盆地型地热资源特征[J]. 中国地质, 46(2): 255-268.

《地质力学学报》预出版

张金川, 林天懿, 孙宇航, 等, 2026. 华夏造山系丰顺水热型地热系统形成模式[J]. 石油勘探与开发, 53(4): 1007-1019.

苏正, 王晓星, 胡剑, 等, 2014. 我国增强型地热系统选址问题探讨[J]. 地球物理学进展，29(1): 386-391

《地质力学学报》预出版